

蛇行閉ループ式熱輸送デバイスの熱輸送特性

Heat Transport Characteristics of Meandering Closed-Loop Heat Transport Device

永 田 真 一*・瀧 田 義 治*・西 尾 茂 文*・白 樫 了*

Shinichi NAGATA, Yoshiharu TAKITA, Shigefumi NISHIO and Ryo Shirakashi

1. 熱輸送デバイス (HTD) とその問題点

両端に温度差 ΔT を設けた長さ L の固体中を長さ方向に伝わる熱流束 q は、周知のように熱伝導法則により $q = k\Delta T/L$ で与えられる (k は棒材の熱伝導率)。いま L を単位長さ、 ΔT を単位温度差とし、固体材として工業的実用材料を考えると、室温近傍では (銅材に相当する) 400 W/m^2 程度が限界である。そこで、この値を大幅に上回る熱流束を実現できる液体封入管などの要素を本稿では熱輸送デバイス (HTD, Heat Transport Device) と呼ぶ。HTD は文字どおり熱を輸送する要素であり、単独で冷却したり加熱したりできる要素ではないが、(1) 発熱部と放熱部とを距離的に分離せざるを得ない場合の熱輸送、(2) 機器などにおける熱拡散・温度均一化、(3) 極限環境機器における熱輸送などの補助デバイスとして有効である。(1) の例としては情報用・パワー用半導体素子の冷却、排熱・未利用エネルギーの有効利用、鑄造金型の冷却などにおける熱輸送を、(2) の例としては人工衛星の構造体、熱交換器フィン、ヒートシンク用熱拡散板などにおける温度均一化を、(3) の例としては宇宙飛行士の温度環境制御、宇宙往還機の冷却、消火ロボットの冷却などにおける熱輸送を挙げることができる。

現在の HTD は熱輸送原理により、入熱部における蒸発・沸騰および放熱部における凝縮を利用する相変化型 HTD と、振動流における熱拡散促進効果を利用する振動流型 HTD とに大別できる。既存 HTD としては、相変化型には液体還流駆動力により重力駆動型 GFD-HTD (サーモサイフォン) および毛管力駆動型 CFD-HTD (いわゆるヒートパイプ) があり、振動流型には強制振動制御型 FOC-HTD (いわゆるドリムパイプ) がある。

HTD に対して要求される性能や機能については、まず必要条件として (a) 上述の輸送熱流束が高いことや (b)

動作が安定していることが挙げられるが、その他に (c) 熱輸送限界が高いこと (あるいは限界がないこと)、(d) 応答性に富むこと、(e) 構造が単純であること、(f) 制御性に富むこと、(g) 使用条件に制約が少ないこと、(h) 自立システムであることなどが要求される場合もある。(c) については高熱流束輸送が必要な場合に、(d) については起動特性や変動する発熱量への対応の観点から、(e) についてはコスト低減やマイクロ HTD あるいはフレキシブル HTD などの開発の観点から、(f) については電子制御など制御の容易性から、(g) および (h) については使用条件の柔軟性の観点からそれぞれ必要となる場合がある。

ところで、HTD と比較すべき基本要素は熱交換器と液体駆動源とを有する通常の強制環流ループ式熱輸送方式 PCL-HEX である。これに対して相変化型の多くのものは、外部動力や還流ループを要しない点で利点があるが、GFD-HTD では利用姿勢に限定があり、CFD-HTD では利用姿勢にやや限定があり、内部構造を有するため経路自由度や細管化に対処し難く、また双方とも制御性や熱輸送限界などの点で弱点を有する。一方、筆者らがこれまで研究してきた FOC-HTD (図 1 左図参照) は、利用姿勢や経路について自由度が高く、制御性に富み、熱輸送限界が無いなどの利点¹⁻⁸⁾ を有するものの、加振機構と加振エネルギーの外部からの投入が必要である点で弱点がある。

そこで、図 1 右図に示したように、FOC-HTD と類似した構造の蛇行流路に液体を封入率 $\alpha < 1$ で満たした ((株) アクトロニクスが開発した) ループ型細管ヒートパイプ (略称 LCHP)⁹⁾ に注目し、液柱の自例振動化を試みた。但し、本報では LCHP と異なる流動様式に注目しており、蛇行閉ループ式 HTD (MCL-HTD, Meandering Closed-Loop HTD) と呼ぶ。

2. 蒸気プラグ伝播現象と液柱自例振動現象

図 2 は、水を封入した内径 2.4 mm のガラス管により液

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

研 究 速 報

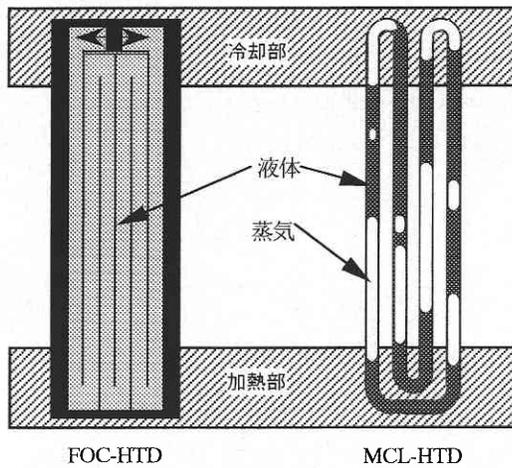


Fig.1 FOC-HTD と MCL-HTD の構造概念図

体封入率 $\alpha = 0.95$ の鉛直姿勢の MCL-HTD を構成し、下部 U 字管部外側に $T_H = 60^\circ\text{C}$ の温水、上部 U 字管部の外側に $T_L = 30^\circ\text{C}$ の冷水を流した場合に得られた現象を示したものである (数値計算結果であるが、実験でもほぼ同様の現象が観察されたので明瞭な計算結果を示した)¹⁰⁾。図中に白線で囲んだ部分をターンと呼ぶと、図 2 は 10 ターンを有し、図 2 左図のターン 6 の白い部分が蒸気プラグである。

図に示されているように、左図でターン 7 に小さな蒸気プラグが発生することにより、液柱は長い液柱と (蒸気プラグ間の) 短い液柱 1 とに分割される。図より分かるように、時間経過とともにターン 7 の短い蒸気プラグが成長し、ターン 6 の長い蒸気プラグは衰退し、図 2 右図では蒸気プラグの直接の移動を伴わずに蒸気プラグがターン 6 から 7 に再現されている。この状況は次々に隣接ターンに伝播し、本条件では約 4 秒後に 10 ターンの伝播が完了する。1 ターン間の伝播過程では、長い液柱は動かず、短い液柱 1 のみ

が運動する。この運動により、液柱 1 の高温部が上部の低温部に、低温部が下部の高温部に輸送され、高温部および低温部で大きな温度差が発生し、有効な熱輸送が起こっている。こうした流動は、長い液柱の摩擦力、慣性力がともに液柱 1 に比べて大きいことにより発生したものと考えられ、ターン数を減らすことにより液柱の自励振動を発生させることができる可能性がある。

そこで、最小ターン数と考えられる 2 ターン鉛直 MCL-HTD (図 1 右図) における流動様相を観察した。図 3 はその結果を模式的に示したものであり、作動液体はエタノール、管材料はガラス、管径は 2.4 mm、液体封入率は (図 2 と同様に) 半ターン分を蒸気プラグが占める条件に近い $\alpha = 0.70$ 、温水温度は $T_H = 70^\circ\text{C}$ 、冷水温度は $T_L = 20^\circ\text{C}$ である。図を見ると分かるように、管 B、D は時間平均的に見て液体の存在割合が高い管であり、管 A、C は液体あるいは蒸気存在割合が高い状態が時間的に交互する管である。図の (1) では、蒸気プラグは管 B の下半分から C にかけて存在し、他の部分は液柱で占められている。この状態で、(図 2 とは異なり) 管 A と D との結合部 (高温部) 付近で気泡が発生し、(2) に示したように液柱は、管 A と B とにかけて存在する液柱と、管 C と D とにかけて存在する液柱とに分かれる。これらの液柱は互いに長さが大きくは異なるため、(2) ~ (4) の過程に示されているように、双方とも管 A と D との結合部で発生した気泡の膨張により駆動される形で運動し、(1) で管 B と C にかけて存在した蒸気プラグは収縮する。この結果、(2) で管 A と B とにかけて存在する液柱は (2) ~ (4) の過程で管 A から B に向かう方向へと移動し、管 C と D とにかけて存在する液柱は管 D から C へと向かう方向へと移動する。(5) では、新たに管 B と C との結合部付近で気泡が発生し、(6) ~ (9) の過程で、液柱は (2) ~ (4) の

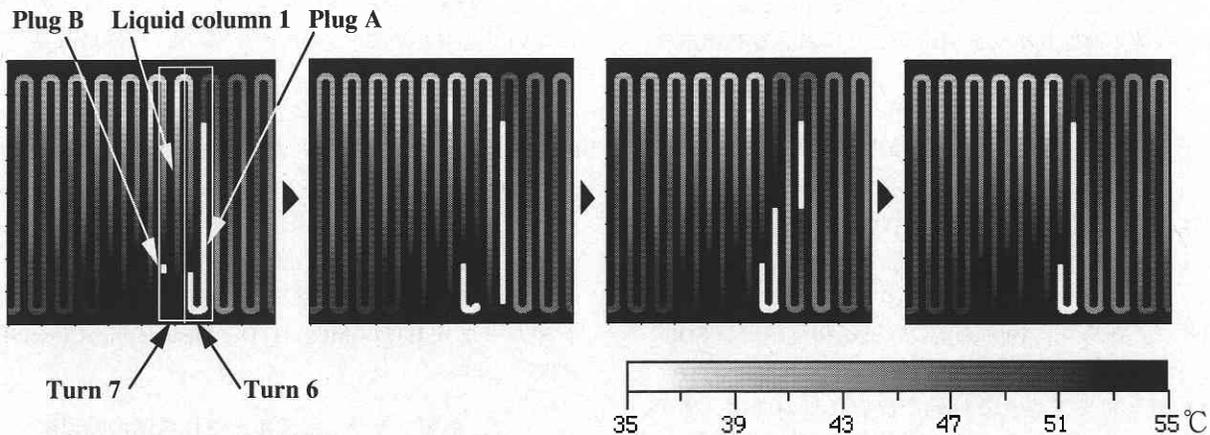


Fig.2 10 ターン MCL-HTD における蒸気プラグ伝播現象 (水, $\alpha = 0.95$, $T_H = 60^\circ\text{C}$, $T_L = 30^\circ\text{C}$)

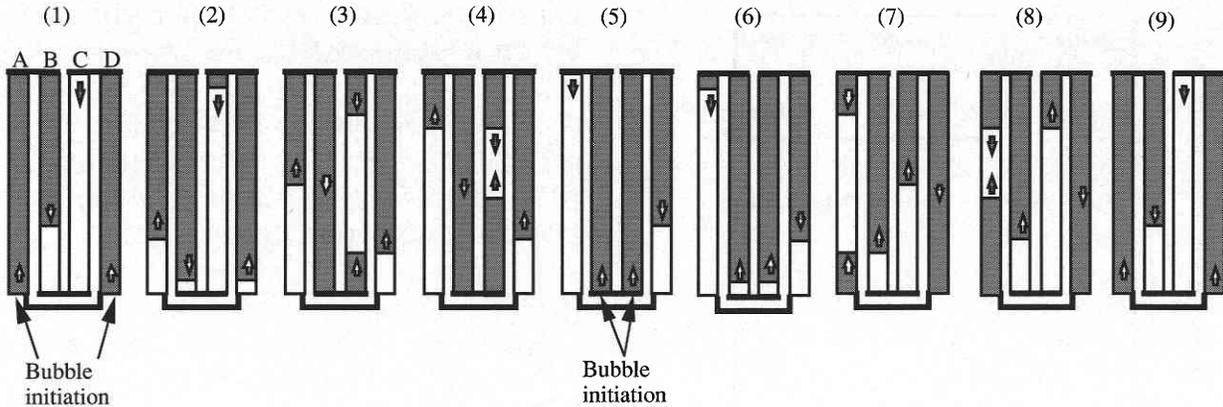


Fig.3 2ターンのMCL-HTDにおける液柱の規則的自励振動現象 (エタノール, $\alpha = 0.70$, $TH = 70^\circ C$, $TL = 20^\circ C$)

過程における方向と逆方向に移動し、初期の状態 (1) に戻っている。

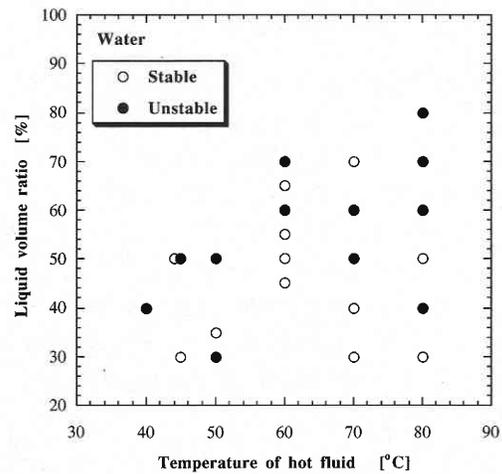
即ち、図3に示した過程において、ほぼ常時液体が存在する管AとBおよびCとDとの結合部 (低温部) では、液柱の規則的振動運動が自動的に発生する。因みに、この条件における実効熱伝導率 (管1本当たりの熱輸送量を加熱部・冷却部間の液体温度勾配と液柱断面積とで割った値) の測定値は $k_{ef} = 3 \times 10^4 W/mK$ 程度であり、この値は FOC-MTD の解析式²⁻⁴⁾ に自励振動の周波数 (図3の条件では 0.7 Hz 程度) と振幅 (図3の条件では 0.2 m 程度) とを代入して得られる $k_{ef} = 6 \times 10^3 W/mK$ より大きく、相変化の効果により FOC-HTD よりさらに効果的な熱輸送が実現できていると考えられる。

3. MCL-HTD の熱輸送管としての特性

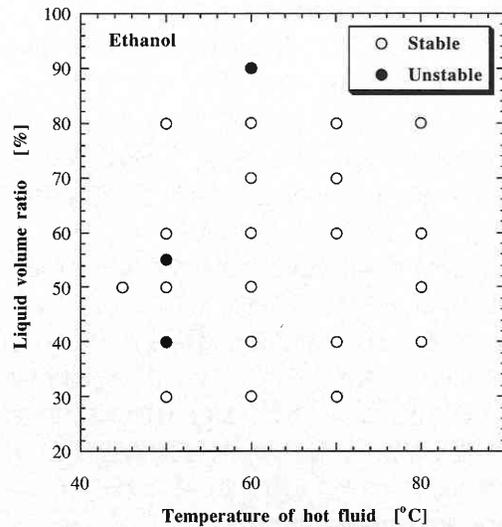
以上では MCL-HTD を FOC-HTD の自励振動化の観点から見たが、MCL-HTD には内部構造を必要とせず構造が単純であることなど熱輸送管としての特長もある。これは、特にマイクロ化やフレキシブル化に適した特長であり、HTD として魅力がある。ここでは、この MCL-HTD の性能を見定めるために筆者らが行ったガラス管 (内径 2.4 mm) 製の MCL-HTD に関する実験結果を中心にまとめる。なお、本実験では、上端 U 字管と下端 U 字管との間隔は 0.3 ~ 0.4 m 程度で、MCL-HTD の下端 U 字管部の外側に温度 TH の温水を、上端 U 字管部の外側に温度 TL の冷水を流し、下端部 (高温部) から上端部 (低温部) に向かって熱輸送を行った。

4.1 MCL-HTD の作動条件

筆者らはガラス製 10 ターン鉛直 MCL-HTD における熱輸送量と温水・冷水温度差 ΔT との関係を実験的に測定し、MCL-HTD が作動開始する下限温度差 ΔT が存在することを示した (10)。また、ガラス製 10 ターン MCL-HTD における実



(a) 水が封入液体の場合



(b) エタノールが封入液体の場合

Fig.4 2ターンの鉛直 MCL-HTD の安定作動範囲

研 究 速 報

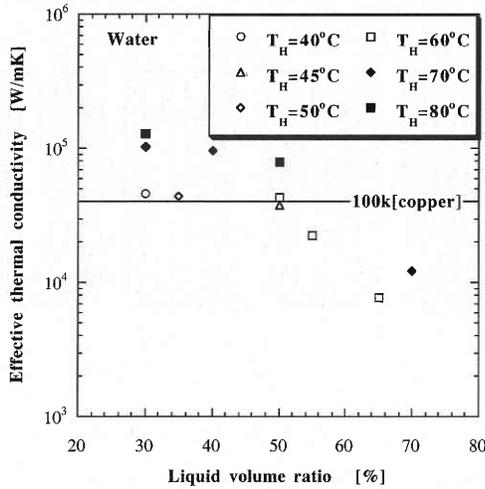


Fig.5 2 ターン鉛直 MCL-HTD の実効熱伝導率

効熱伝導率の傾斜角 ϕ (鉛直からの傾斜角) 依存性に関する実験結果より、 $\phi = 60$ 度を超える傾斜角では安定作動は得られなかったことを報告している¹¹⁾ (但し、MCL-HTD の作動条件は、管材料や高温・低温部長さなどにも依存し、この結果は最も作動し難いと考えられる管材料 (ガラス) において得られた結果であることを付言しておく)。さらに、MCL-HTD が作動する管寸法条件については、蒸気が管内に充満し蒸気プラグを形成することであると考える、この条件を解析し鉛直 MCL-HTD について次式を提案した¹⁰⁾。

$$R_{\max} = 0.92 \sqrt{\frac{\sigma(\rho_l - \rho_g)}{g}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで R_{\max} は気泡が充満する最大の管内径、 σ は封入液体の表面張力、 ρ は密度、 g は重力加速度である。因みに小泉ら¹²⁾ も類似した結果を得ている。

本研究では、(1) 式の妥当性を検討する実験を行った。図 4 は、冷水温度を $T_L = 20^\circ\text{C}$ と固定した場合のガラス製 2 ターン鉛直 MCL-HTD の安定作動範囲を、温水温度 T_H をパラメータとして図示したものである。ここで、不安定作動とは、実効熱伝導率が顕著に振動する場合、あるいは液体の流動が停止する場合などを意味する。図示した双方の液体とも管径は (1) 式の条件を満足しているが、(1) 式の上限值に近いエタノールの方が水より安定作動範囲が広いことが分かる。このことは、MCL-HTD には安定作動する最小半径が存在し、管径は (1) 式の右辺に近いほど安定作動範囲が広いことを示唆していると考えられる。

4.2 MCL-HTD の熱輸送特性

文献 (10) に示したように、MCL-HTD の熱輸送量は高温・低温部間の温度差にほぼ比例する。このことは、

MCL-HTD の総括熱抵抗の大半は、MCL-HTD に熱が出入りする高温・低温部の熱抵抗によって占められていることを示唆している。高温・低温部における熱抵抗は、管壁の熱伝導抵抗と管外部の熱抵抗とで構成され、それぞれ設計により変化する。そこで、ここでは MCL-HTD 内部の実効熱伝導率を性能の目安として検討する。図 5 は、ガラス製 2 ターン鉛直 MCL-HTD における実効熱伝導率 k_{ef} の実験結果を液体封入率 α に対して図示したものである。図中には参考のために銅の 100 倍の熱伝導率を実線で示した。本 HTD では銅の 100 倍程度の実効熱伝導率が実現できることが分かる。因みに、10 ターン鉛直 MCL-HTD における実験結果¹⁰⁾ と比較すると、安定作動範囲内では 2 ターン鉛直 MCL-HTD の方が高い実効熱伝導率を示すことが分かる。

5. ま と め

本報では、蛇行閉ループ式 HTD により、強制振動制御型 MHD の加振機構を除去することおよび高性能 HTD を実現することを目的として、最小ユニットと考えられる 2 ターン鉛直 MCL-HTD について実験的検討を行い、2 ターン鉛直 MCL-HTD により液柱の規則的自励振動が実現できること、また 10 ターン鉛直 MCL-HTD より高い熱輸送能力が得られることを示した。

(1998 年 6 月 9 日受理)

参 考 文 献

- 1) S. Nishio, Thermal Science and Engineering, Vol. 4, No. 1 (1996), pp. 468-475.
- 2) 西尾・本間・張, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 60, No. 569(1994), pp. 233-239.
- 3) 西尾・張, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 60, No. 570 (1994), pp.627-633.
- 4) 西尾・史・舟津, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 60, No. 578 (1994), pp. 3498-3503.
- 5) S. Nishio, X. -H. Shi and W. -M. Zhang, Intern. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 38, No. 13(1995), pp. 2457-2470.
- 6) 西尾・申, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 61, No. 588 (1995), pp.3052-3058.
- 7) 申・西尾, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 63, No. 608 (1997), pp. 1367-1374.
- 8) 申・西尾・呉・上村, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 64, No. 619 (1998), pp. 890-896.
- 9) 赤地, 最近のヒートパイプ応用技術, (1991), pp. 13-41.
- 10) 細田・西尾・白樫, 日本機械学会論文集 (B 編), 掲載予定.
- 11) 西尾・細田・永田・渡辺, 第 34 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I (1997), pp. 269-270.
- 12) 小泉, 公開特許公報, (1992), 平 4-20788.